

鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马四段白云岩 储层特征及主控因素

苏文杰^{1,2,3}, 鲁慧丽⁴, 乔德民⁵, 李辉³, 石磊³, 罗开通⁶

1 西安石油大学; 2 陕西省油气成藏地质学重点实验室; 3 中国石油长庆油田公司勘探事业部;
4 中国石油杭州地质研究院; 5 中国石油集团渤海钻探工程有限公司第二录井分公司; 6 重庆科技大学

摘要 米探1井等多口探井在鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马四段白云岩中获得高产天然气流,展示出该区域马四段具有良好的勘探前景。然而对盆地东北部马四段是否发育规模白云岩储层还存在争议,白云岩储层分布不清制约了下一步勘探部署。基于岩心、薄片、场发射扫描电镜及地球化学特征等资料,对盆地东北部奥陶系马四段白云岩储层特征及其发育控制因素开展了系统研究,并预测了盆地东北部奥陶系马四段白云岩储层分布。研究结果表明:①盆地东北部奥陶系马四段白云岩发育潮坪型白云岩储层、丘滩型白云岩储层和生物扰动型白云岩储层,3类白云岩储层储集空间主要为晶间孔,含少量微裂缝,平均孔隙度分别为4.77%、5.12%和2.52%。②白云岩储层的形成与丘滩体、生物扰动作用和白云石化作用相关。白云石化作用是潮坪型白云岩储层晶间孔形成的关键,丘滩体和白云石化作用控制了丘滩型白云岩储层发育,生物扰动作用和白云石化作用控制了生物扰动型白云岩储层发育。③盆地东北部神木—靖边地区在奥陶纪马四期位于低隆起带上,有利于丘滩体发育和生物扰动作用、白云石化作用的发生,形成的白云岩储层可为天然气富集提供规模储集空间。

关键词 白云石化作用; 生物扰动作用; 丘滩体; 白云岩储层; 马四段; 鄂尔多斯盆地东北部

中图分类号: TE122.1 **文献标识码**: A

引用: 苏文杰,鲁慧丽,乔德民,等. 鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马四段白云岩储层特征及主控因素[J]. 海相油气地质, 2024, 29(2): 125-135.

SU Wenjie, LU Huili, QIAO Demin, et al. Characteristics and main controlling factors of dolomite reservoir in the fourth member of the Ordovician Majiagou Formation in the northeast of Ordos Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2024, 29(2): 125-135.

0 前言

鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组是一套蒸发岩和碳酸盐岩共生的沉积地层,其内部的碳酸盐岩蕴藏丰富的天然气资源^[1]。针对马家沟组海相碳酸盐岩的勘探始于20世纪80年代末,经过30年来的持续勘探,已在马五段发现了以膏模孔为储集空间的岩溶风化壳气藏^[2-3]和以晶间孔为储集空间的白云岩岩性气藏^[4-6],累计提交了万亿方规模的储量^[7]。2020年,为了在马四段中寻找天然气勘探新领域,中国石油长庆油田公司在盆地东北部神木地区部署实施了专门针对马四段的风险探井(米探1井)。2021年,米探1井在马四段首次获得了无阻流量 $35.24 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产天然气^[8],表明马四段具有良

好的勘探潜力。2022年,为了进一步扩大马四段天然气勘探成果,长庆油田公司在盆地东北部榆林地区部署实施了榆阳1井和靖探2井2口风险探井。2023年,榆阳1井和靖探2井在马四段白云岩试气分别获得 $1.84 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $0.64 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的低产气流,虽未取得重大勘探突破,但进一步证实盆地东北部马四段具有大面积含气的特征,是天然气增储上产的现实领域。

截至目前,前人关于马四段白云岩储层特征及其成因的研究相对较少^[9-16],而且主要集中于盆地中(南)部马四段细晶白云岩^[9-13],仅有少量学者以段为单位对盆地中东部或东部米脂地区马四段白云岩储层开展过研究^[14-17]。而且,对盆地东北部马四段是否发育规模储层及规模储层类型存在明显

收稿日期: 2024-01-22; 改回日期: 2024-04-17

本文受中国石油天然气集团有限公司攻关性应用性科技专项“碳酸盐岩油气富集规律及有利区带研究”(2023ZZ16YJ01)和长庆油田公司重大科技专项“鄂尔多斯盆地中元古界—奥陶系构造沉积演化、成源机制与勘探新领域研究”(ZDZX2021)联合资助

第一作者: 苏文杰,在读硕士,工程师,主要从事天然气勘探研究工作。通信地址: 710018 陕西省西安市未央区凤城四路长庆科技; E-mail: suwj_cq@petrochina.com.cn

通信作者: 鲁慧丽,硕士,高级工程师,主要从事碳酸盐岩储层预测工作。通信地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号; E-mail: luhl_hz@petrochina.com.cn

的分歧,例如:付金华等^[8]认为盆地东北部集群式发育台内颗粒滩和台内丘白云岩储层;牟春国等^[16]认为盆地东北部马四段主要沿神木—米脂一带发育规模储层;于洲等^[17]认为盆地东北部集群式发育丘滩体白云岩储层和斑状白云岩储层。白云岩储层分布不清制约了该区域下一步勘探部署。本文基于岩心、薄片、场发射扫描电镜及地球化学特征等资料,对盆地东北部奥陶系马四段白云岩储层类型、特征及其发育控制因素开展了系统研究,并预测了盆地东北部马四段有利白云岩储层分布范围,以期为该区域下一步天然气勘探部署提供参考依据。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地是一个在早元古代结晶基底之上形成的多旋回大型叠合盆地^[1]。奥陶纪马家沟

期,鄂尔多斯盆地中部鄂托克旗—定边—庆阳一带发育一个大型古隆起——中央古隆起,该隆起西侧为西南边缘坳陷,属于祁连海沉积体系;古隆起东侧为以米脂—延安为沉积中心、古地势向周缘缓慢上升的米脂坳陷,属于华北海沉积体系。受蒸发作用、海平面升降变化和盆地周缘古隆起障壁作用控制,鄂尔多斯盆地中央古隆起东侧在马家沟期沉积了一套蒸发岩和碳酸盐岩共生的岩性组合^[18-22],残余地层厚度介于0~600 m,自下而上依次划分为马一段至马六段等6段,其中马一段、马三段和马五段主要为蒸发岩沉积,马二段、马四段和马六段主要为碳酸盐岩沉积^[17-22]。

目的层马四段位于马家沟组中部,是马家沟期最大海侵沉积。构造-岩相古地理研究新进展揭示,鄂尔多斯盆地在奥陶纪马四期为一个具有“两陆三隆四坳”古构造格局的碳酸盐缓坡^[23](图1a),研

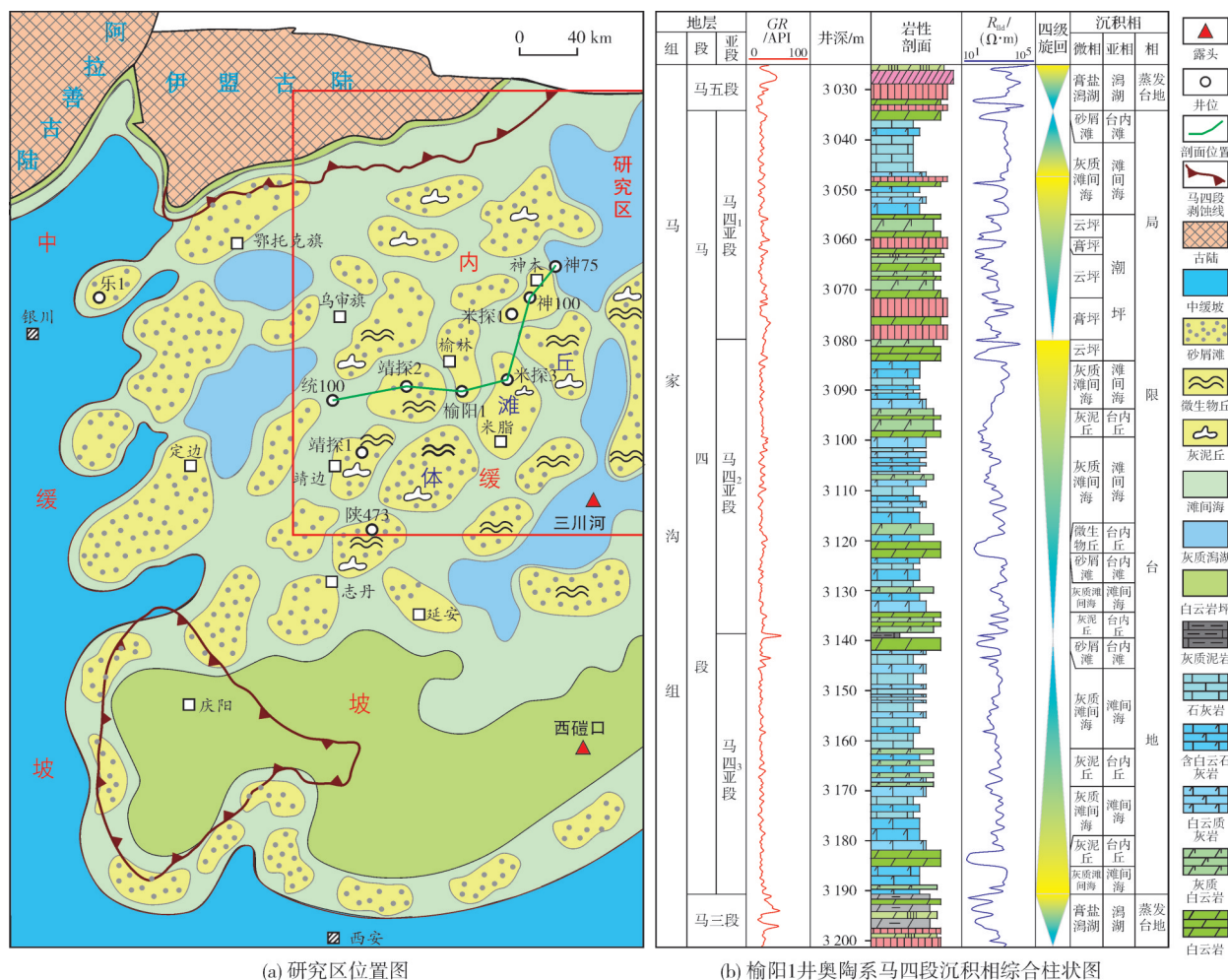


图1 研究区位置及榆阳1井奥陶系马四段沉积相综合柱状图(据文献^[23]修改)

Fig. 1 Tectonic location of the study area and comprehensive column of the fourth member of the Ordovician Majiagou Formation (O_4m_4) in Well Yuyang 1 (cited from reference^[23])

究区主要位于内缓坡。前人根据地层岩性差异特征和勘探需求,又将马四段由下至上细分为马四₃亚段、马四₂亚段和马四₁亚段^[8,14]。形成于相对海侵期的马四₃亚段岩性以石灰岩和白云质灰岩为主,顶部和底部夹少量灰质白云岩和白云岩薄层;形成于相对海退期的马四₂亚段纵向上由白云岩和石灰岩不等厚互层组成;马四₁亚段由上、下两段岩性组成,形成于相对海侵期的下段由蒸发岩和碳酸盐岩组成,其中蒸发岩主要为白云质硬石膏岩和膏质白云岩,碳酸盐岩主要为白云岩、灰质白云岩和白云质灰岩,形成于相对海侵期的上段主要由石灰岩组

成,顶部为一套薄层白云岩(图1b)。

2 白云岩储层特征

基于钻井岩心和微观薄片,识别出鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马四段主要发育潮坪型白云岩储层、丘滩型白云岩储层和生物扰动型白云岩储层。潮坪型白云岩储层主要发育于马四₁亚段,马四₂亚段顶部有少量分布;丘滩型白云岩储层主要发育于马四₂亚段,马四₃亚段和马四₁亚段顶部有少量分布;生物扰动型白云岩储层主要发育于马四₂亚段,马四₃亚段底部有少量分布(图2)。

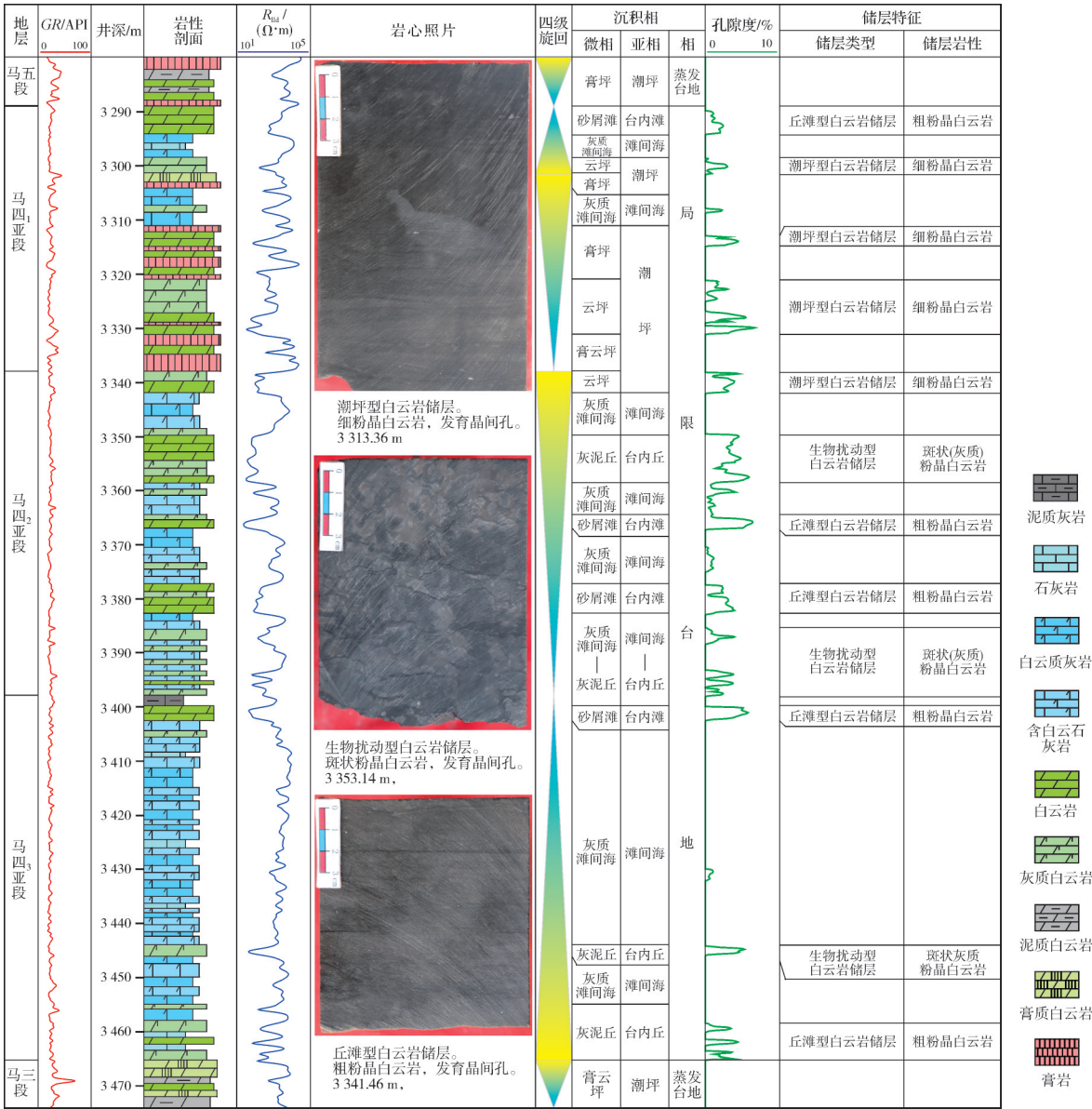


图2 靖探2井奥陶系马四段储层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive column of the O₁m₄ reservoir in Well Jingtian 2

2.1 潮坪型白云岩储层

潮坪型白云岩储层岩性为细粉晶白云岩(图3a),主要由细粉晶白云石组成(图3b),部分白云岩中可见少量白云石晶粒和板柱状硬石膏晶体。

潮坪型白云岩储层储集空间主要为晶间孔(图3b),含少量微裂缝(图3a)。晶间孔主要发育于自形程度较好的白云石晶体之间,晶间孔径一般介于0.001~0.005 mm,部分孔隙中可见方解石充填。

岩心样品分析数据统计表明:潮坪型白云岩储

层孔隙度介于1.16%~13.21%,平均值为4.77%,分布于2%~4%之间的样品占40.7%,大于4%的样品占47.5%(图4a);渗透率介于 $(0.002\ 3\sim 5.146\ 0)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,平均值为 $0.129\ 4\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,渗透率小于 $0.01\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 的样品占77.6%,大于 $0.01\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 的样品占22.4%(图4b)。

2.2 丘滩型白云岩储层

丘滩型白云岩储层岩性主要为粗粉晶白云岩(图3c、3d)、粉—细晶白云岩(图3e)和纹层白云岩

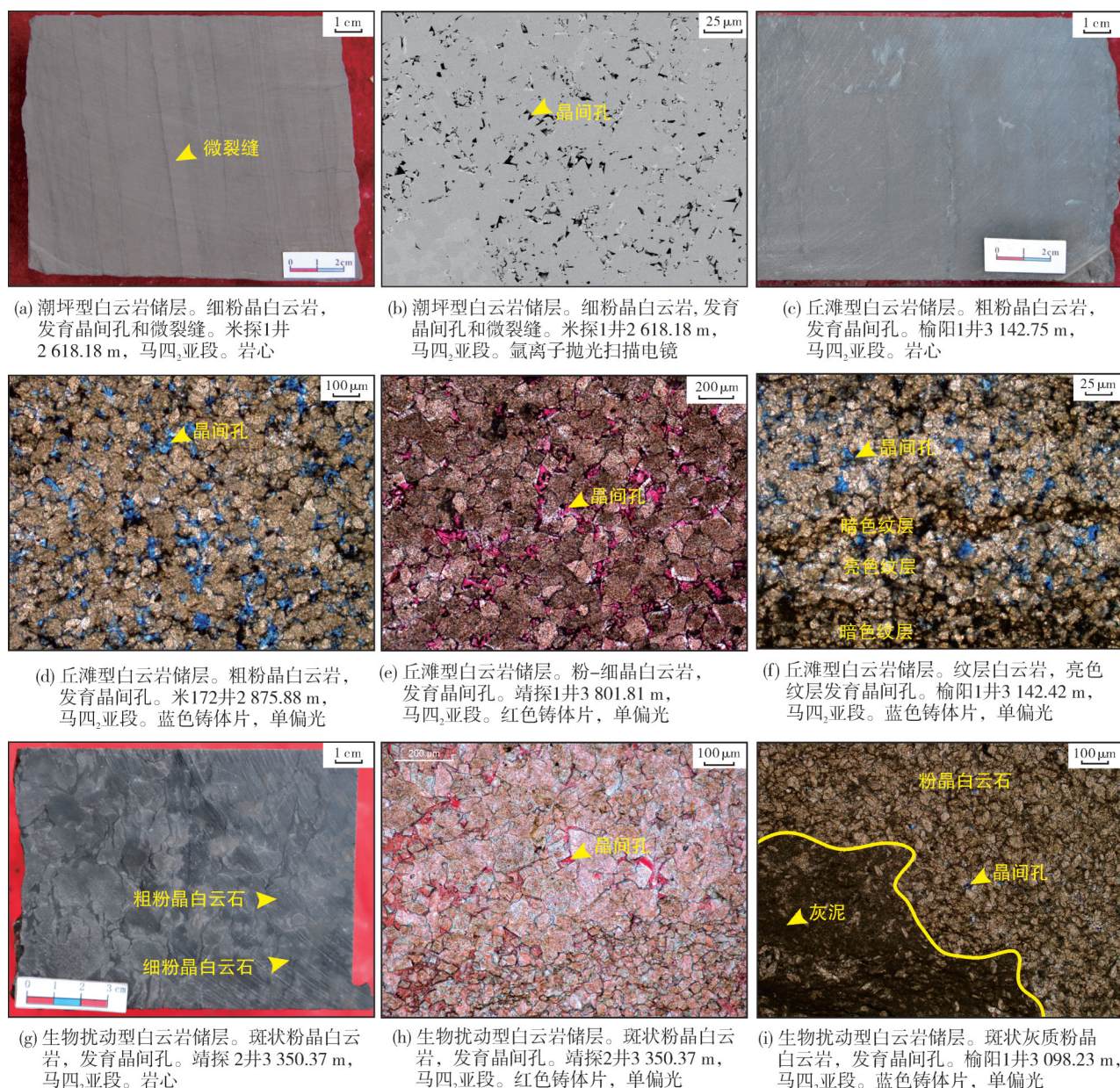


图3 鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马四段白云岩储层岩石学及孔隙特征

Fig. 3 Petrology and pore characteristics of the O₁m₄ dolomite reservoir in the northeast of Ordos Basin

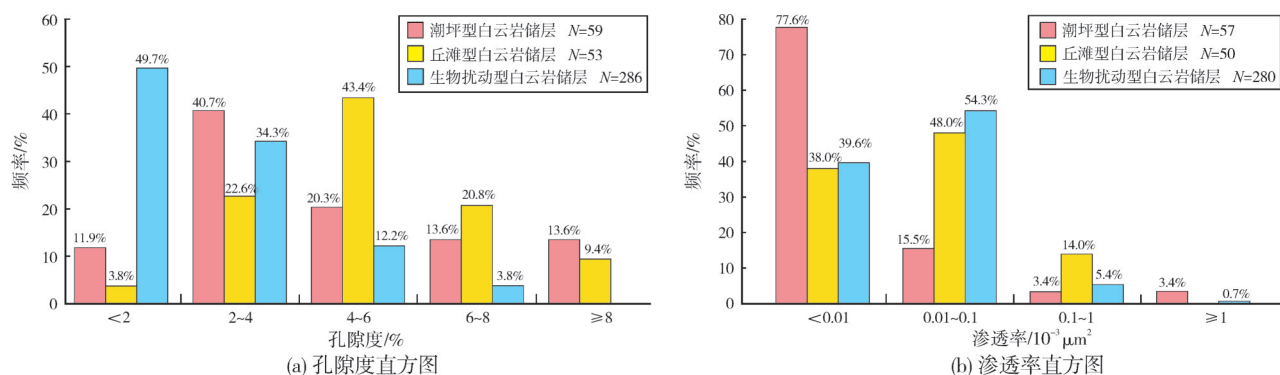


图4 鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马四段白云岩储层物性直方图

Fig. 4 Physical property histograms of the O_1m_4 dolomite reservoir in the northeast of Ordos Basin

(图3f)。粗粉晶白云岩由粗粉晶白云石和少量细粉晶白云石组成,白云石晶体以自形晶为主。粉—细晶白云岩由细晶白云石和少量粗粉晶白云石组成,白云石晶体以自形晶为主(图3e)。纹层白云岩由暗色纹层和亮色纹层组成(图3f):暗色纹层主要由泥晶白云石组成,含少量粉晶白云石,岩性致密、孔隙不发育;亮色纹层由粉晶白云石组成,发育晶间孔。

丘滩型白云岩储层储集空间主要为晶间孔,含少量微裂缝。晶间孔孔径一般介于0.01~0.1 mm,部分孔隙中可见石英和方解石等矿物半充填或全充填。裂缝既有高角度裂缝,也有近水平状微裂缝,其形成可能与构造作用有关。裂缝有效地改善了储层的渗流能力。

岩心样品分析数据统计表明:丘滩型白云岩储层孔隙度介于1.33%~9.39%,平均值为5.12%,分布于4%~6%之间的样品占43.4%,大于6%的样品比例为30.2%(图4a);渗透率介于 $(0.001\ 6\sim0.239\ 6)\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,平均值为 $0.046\ 1\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,主要分布于 $(0.01\sim0.1)\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,渗透率小于 $0.01\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 的样品比例为38.0%,大于 $0.1\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 的样品占14.0%(图4b)。

2.3 生物扰动型白云岩储层

生物扰动型白云岩储层岩性为斑状粉晶白云岩和斑状灰质粉晶白云岩。斑状粉晶白云岩主要由浅灰色粗粉晶白云石斑块组成,含少量由灰色他形细粉晶白云石组成的围岩(图3g, 3h);斑状灰质粉晶白云岩主要由浅灰色粉晶白云石斑块组成,含少量由灰色灰泥(图3i)或颗粒组成的围岩。

生物扰动型白云岩储层储集空间主要为晶间孔(图3h, 3i)和微裂缝。晶间孔发育于白云石斑块

中,孔径一般介于0.001~0.05 mm。微裂缝宽度一般介于0.5~2.0 mm^[15],其形成可能与构造作用有关,部分裂缝被方解石充填,未充填的微裂缝对改善储层渗流能力发挥了重要的作用。

岩心样品分析数据统计表明:生物扰动型白云岩储层孔隙度介于0.48%~7.89%,平均值为2.52%,小于2%的样品占49.7%,2%~4%的样品比例为34.3%,4%~6%的样品比例为12.2%,大于6%的样品比例为3.8%(图4a);渗透率介于 $(0.001\ 6\sim2.275\ 0)\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,平均值为 $0.046\ 0\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,小于 $0.01\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 的样品比例为39.6%,介于 $(0.01\sim0.1)\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 的样品占54.3%,大于 $0.1\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 的样品占6.1%(图4b)。

3 储层发育主控因素

3.1 潮坪型白云岩储层控制因素

潮坪型白云岩储层常与具鸡笼铁丝构造的含膏白云岩和膏岩伴生,纵向上常呈现出“下部为潮坪白云岩、上部为含膏白云岩和硬石膏”的高频向上变浅旋回特征(图5a)。碳氧锶同位素测试显示,该类细粉晶白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 一般为 $-0.80\text{‰}\sim-0.82\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 一般为 $-5.94\text{‰}\sim-5.14\text{‰}$ (图6a), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值一般为0.708 8~0.709 0(图6b),绝大部分分布在同期奥陶纪海水范围内($\delta^{13}\text{C}$: $-2.0\text{‰}\sim-0.5\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$: $-6.6\text{‰}\sim-4.0\text{‰}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$:0.708 7~0.709 2)^[24-25],表明白云石化流体为蒸发作用形成的富 Mg^{2+} 浓缩海水。

综合岩石学特征、碳氧锶同位素和低频向上变浅旋回分析认为,该类白云岩储层孔隙主要由准同生白云石化作用形成。相较形成于蒸发潮坪相中常暴露于地表的含膏白云岩和含硬石膏结核白云

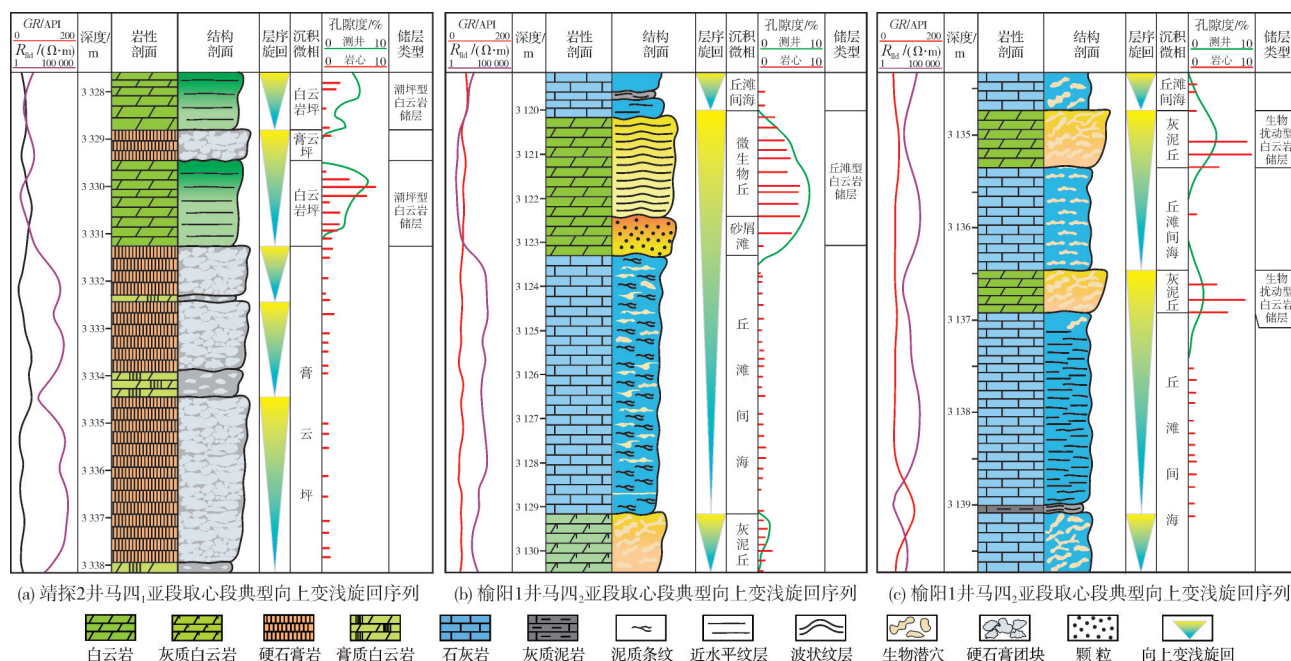


图5 鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马四段典型高频层序旋回及储层综合柱状图

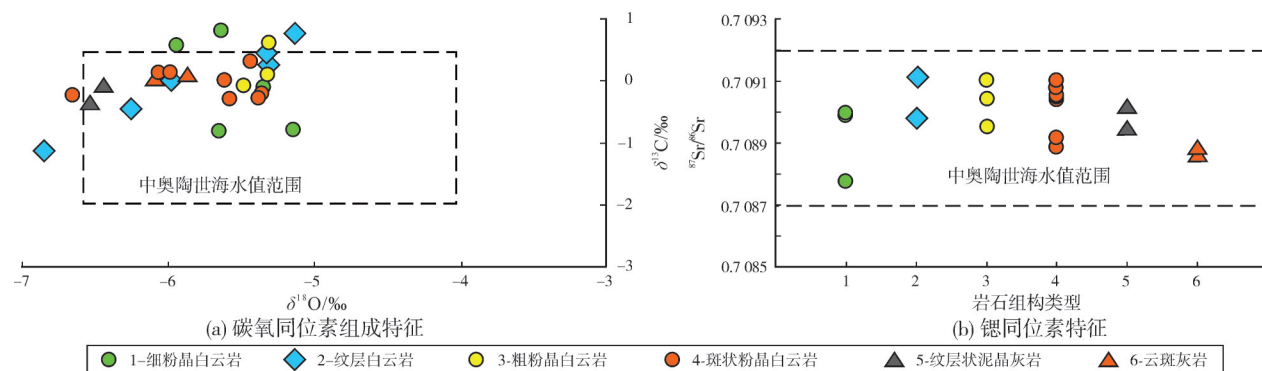
Fig.5 Typical high-frequency sequence cycles and reservoir comprehensive column of the O_1m_4 in the northeast of Ordos Basin

图6 鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马四段碳氧锶同位素地球化学特征图

Fig. 6 Geochemical characteristics of carbon, oxygen and strontium isotopes of the O_1m_4 in the northeast of Ordos Basin

岩,该类细粉晶白云岩位于海平面平均高潮线附近,沉积水体相对较深,白云石生长速率相对较慢。因此,该类白云岩储层中的白云石自形程度高,以自形细粉晶白云石为主,白云石晶体间均匀发育晶间孔。

3.2 丘滩型白云岩储层控制因素

丘滩型白云岩储层形成于潮间带和潮上带下部,纵向上常与纹层状泥晶灰岩或云斑灰岩伴生,常呈现出“下部为云斑灰岩、上部为晶粒化的粗粉晶白云岩和叠层石白云岩”的高频向上变浅旋回特征(图5b)。碳氧锶同位素测试显示,该类粗粉晶白云岩和纹层白云岩的 $\delta^{13}C$ 一般为 -1.11‰ ~ -0.77‰ , $\delta^{18}O$

一般为 -6.85‰ ~ -5.13‰ (图6a), $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值一般为 0.7090 ~ 0.7091 (图6b),均分布在同期奥陶纪海水范围内,表明白云石化流体为蒸发作用形成的富 Mg^{2+} 浓缩海水。

综合岩石学特征、碳氧锶同位素和高频向上变浅旋回分析认为,丘滩体和白云石化作用控制了丘滩型白云岩储层的发育。微生物丘或颗粒滩在沉积过程中易于形成间隙^[26],从而为丘滩型储层发育奠定物质基础。白云石化作用改造了部分颗粒白云岩的岩石类型和孔隙结构,导致颗粒结构、粒间孔分别转变为晶粒结构和晶间孔。目前可观察到的晶间孔事实上为沉积期的粒间孔^[27]。另外,白云石化作用增强了储层的抗压能力,有利于晶间孔的保存。

3.3 生物扰动型白云岩储层控制因素

生物扰动型白云岩储层纵向上常与纹层状泥晶灰岩或云斑灰岩伴生,常呈现出“下部为云斑灰岩、上部为斑状灰质白云岩和斑状粉晶白云岩”的高频向上变浅旋回特征,反映出该类储层形成于水动力较弱的相对低能环境(图5c)。碳氧锶同位素测试显示,该类斑状白云岩储层中白云石斑块的 $\delta^{13}\text{C}$ 一般为 -0.22‰ ~ -0.15‰ (图6a), $\delta^{18}\text{O}$ 一般为 -6.65‰ ~ -5.64‰ (图6b), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值一般为 0.7089 ~ 0.7090 ,均分布在同期奥陶纪海水范围内,表明白云石化流体为蒸发作用形成的富 Mg^{2+} 浓缩海水。

基于岩石学特征、碳氧锶同位素和高频向上变浅旋回,并结合前人关于豹斑成因的认识^[14, 28]分析认为,生物扰动作用和白云石化作用控制了斑状白云岩储层发育。生物在基质孔隙不发育的灰泥沉积物中爬行、觅食或居住,形成斑点状、斑块状或树枝状潜穴,这些潜穴在下一个高频旋回中被灰泥充填物充填,但仍较为疏松,残留的储集空间为斑状白云岩储层发育奠定了基础。白云石化作用形成的粉晶白云石以点接触或线接触为主,使得早期潜穴中的孔隙被改造为晶间孔隙。白云石具有较强的抗压性,有利于形成的晶间孔隙在后期埋藏条件下得到良好的保存。

4 有利白云岩储层分布预测

鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马四段白云岩储层形成与丘滩体、生物扰动作用和白云石化作用相关。准同生期,在潮下带低能环境中,单个高频向上变浅旋回沉积物自下而上受生物扰动改造程度逐渐增强,沉积物中的潜穴由下部零星分布向旋回上部密集分布转变(图7a)。相较于坳陷和凹陷,隆起和凸起易受到海平面变化的影响,有利于生物扰动作用的发生,从而发育生物扰动型白云岩储层。从潮下低能环境到潮间带高能环境水动力逐渐增强,隆起和凸起在海平面下降过程中水动力亦逐渐增强,从而有利于颗粒滩堆积和微生物的繁盛。这些颗粒或微生物在沉积、堆积过程中易于形成间隙,成为马四段丘滩型白云岩储层发育的先存孔隙。在潮上带低能环境中,盐度值增加不再适合生物活动、水体能量降低不利于丘滩体发育,但强烈的蒸发作用和局限环境有利于富 Mg^{2+} 浓缩海水的形成,促使灰泥发生准同生白云石化并发育晶间孔(图7b)。综上所述,古地貌高部位有利于丘滩体发育、生物扰动作用和白云石化作用的发生,因此,可结合沉积古地貌及岩相古地理对马四段储层进行预测。

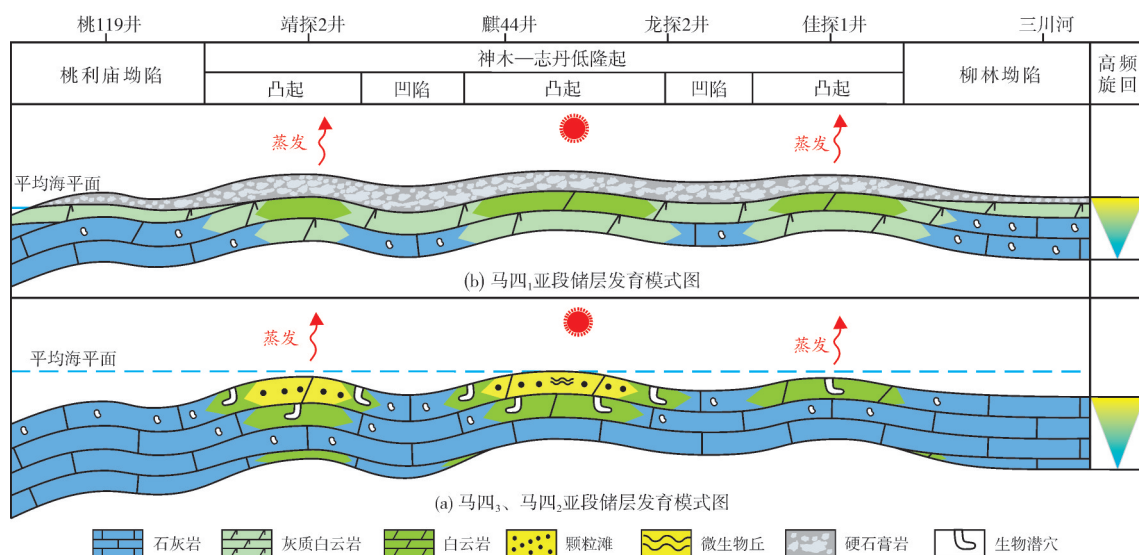


图7 鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马四段白云岩储层发育模式图

Fig. 7 Development pattern of the O_1m_4 dolomite reservoir in the northeast of Ordos Basin

构造古地理格局研究新进展显示,鄂尔多斯盆地在奥陶纪马四期具有“两陆三隆四坳”的构造古地理格局^[27]。“两陆”为伊盟古陆、阿拉善古陆,“三

隆”为中央古隆起、中条古隆起、神木—志丹低隆起,“四坳”则指西南边缘坳陷、桃利庙坳陷、府谷坳陷和柳林坳陷。盆地东北部神木—靖边地区位于

神木—志丹低隆起带上。在马四期构造—岩相古地理研究新进展的基础之上,结合盆地东北部新钻井和马四段连井储层对比剖面(图8),编制了鄂尔

多斯盆地东北部马四₃亚段、马四₂亚段和马四₁亚段白云岩储层厚度图(图9)。马四₃亚段主要发育生物扰动型白云岩储层,顶部发育薄层丘滩型白云岩

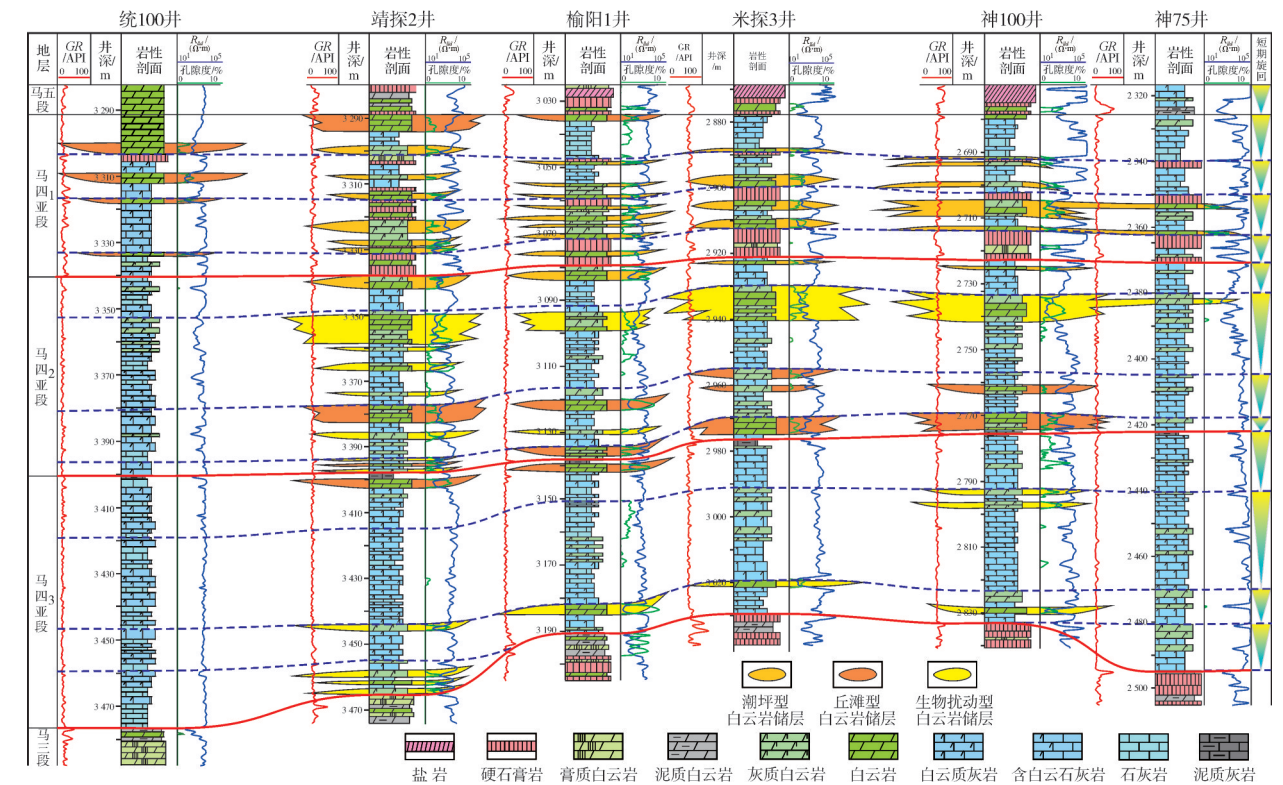


图8 鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马四段白云岩储层连井对比剖面(剖面位置见图1a)

Fig. 8 Inter-well comparison section of the O_1m_4 dolomite reservoir in the northeast of Ordos Basin (location is shown in Fig. 1a)

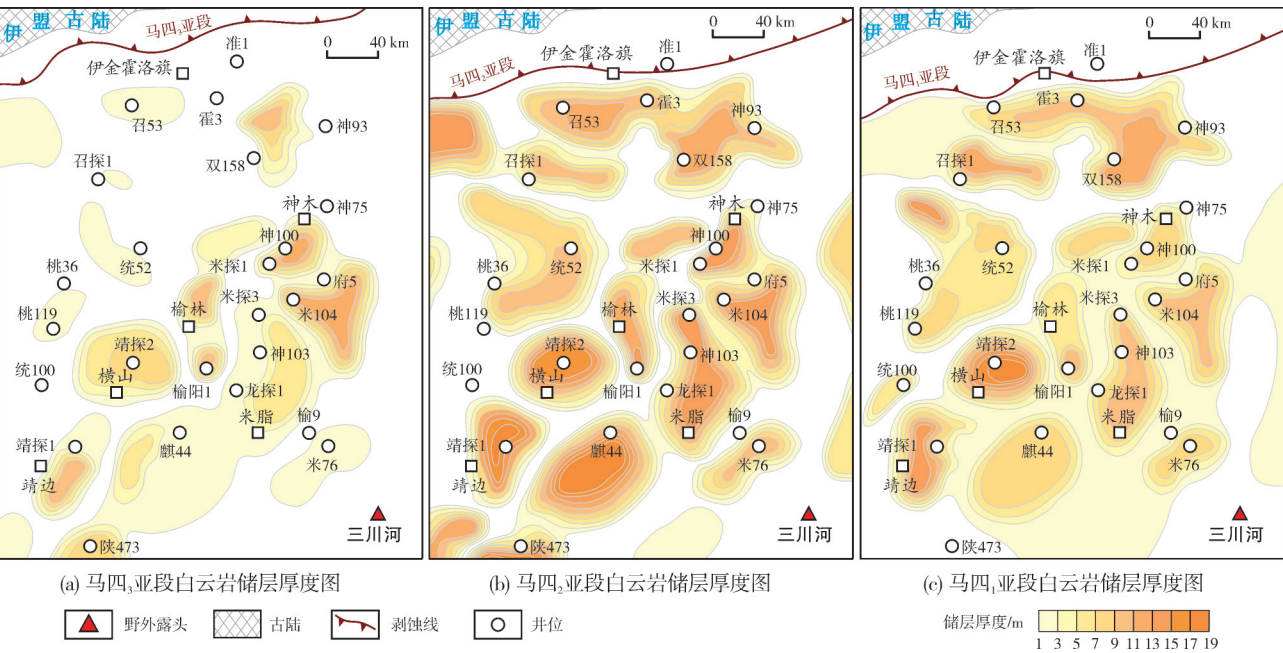


图9 鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马四段白云岩储层厚度图

Fig. 9 Isopach maps of O_1m_4 dolomite reservoir in the northeast of Ordos Basin

储层,单层白云岩厚度为1~3 m,累计厚度一般为2~6 m,最厚可达10 m,主要沿神木—榆林—靖边地区分布(图9a)。马四₂亚段主要发育生物扰动型白云岩储层和丘滩型白云岩储层,顶部发育薄层潮坪型白云岩储层,单层白云岩厚度为1~5.5 m,累计厚度一般为12~24 m,最厚可达37.9 m,其分布范围较马四₃亚段广,主要沿伊金霍洛旗—神木—榆林—靖边地区分布(图9b)。马四₁亚段主要发育潮坪型白云岩储层,顶部发育薄层丘滩型白云岩储层,白云岩单层厚度为1~2 m,累计厚度一般为2~16 m,最厚可达23.4 m,主要沿伊金霍洛旗—神木—榆林—靖边地区分布。总的来说,鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马四₃亚段、马四₂亚段和马四₁亚段均沿神木—榆林—靖边地区广泛发育规模白云岩储层,为天然气富集提供了良好的储集条件。

5 结 论

(1)鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马四段主要发育潮坪型白云岩储层、丘滩型白云岩储层和生物扰动型白云岩储层。潮坪型白云岩储层岩性为细粉晶白云岩,储集空间主要为晶间孔和微裂缝,平均孔隙度为4.77%;丘滩型白云岩储层岩性为粉—细晶白云岩、粗粉晶白云岩和纹层白云岩,储集空间主要为晶间(溶)孔和微裂缝,平均孔隙度为5.12%;生物扰动型白云岩储层岩性为斑状粉晶白云岩和斑状灰质白云岩,储层储集空间以晶间孔为主,发育少量晶间溶孔和微裂缝,平均孔隙度为2.52%。

(2)鄂尔多斯盆地东北部马四段储层发育主要受丘滩体、生物扰动作用和白云石化作用控制。白云石化作用控制了潮坪型白云岩储层发育;丘滩体和白云石化作用控制了丘滩型白云岩储层发育;生物扰动作用和白云石化作用控制了生物扰动型白云岩储层发育。

(3)鄂尔多斯盆地东北部神木—榆林—靖边地区在奥陶纪马四期位于神木—志丹低隆起带上,有利于丘滩体沉积、生物扰动作用和白云石化作用的发生,发育的白云岩储层可为天然气富集提供规模储集空间。

参 考 文 献

- [1] 付金华,孙六一,冯强汉,等.鄂尔多斯盆地地下古生界海相碳酸盐岩油气地质与勘探[M].北京:石油工业出版社,2018.
- FU Jinhua, SUN Liuyi, FENG Qianghan, et al. Petroleum geol-

- ogy and exploration of Lower Paleozoic marine carbonate rocks in Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.
- [2] 马振芳,陈安宁,王景.鄂尔多斯盆地中部古风化壳气藏成藏条件研究[J].天然气工业,1998,18(1):9-13.
- MA Zhenfang, CHEN Anning, WANG Jing. A study of the conditions of forming the fossil weathered residuum gas reservoir in the centre of Ordos Basin[J]. Natural gas industry, 1998, 18(1): 9-13.
- [3] 杨华,付金华,魏新善.鄂尔多斯盆地天然气成藏特征[J].天然气工业,2005,25(4):5-8.
- YANG Hua, FU Jinhua, WEI Xinshan. Characteristics of natural gas reservoir formation in E'erdusi Basin[J]. Natural gas industry, 2005, 25(4): 5-8.
- [4] 杨华,包洪平.鄂尔多斯盆地奥陶系中组合成藏特征及勘探启示[J].天然气工业,2011,31(12):11-20.
- YANG Hua, BAO Hongping. Characteristics of hydrocarbon accumulation in the middle Ordovician assemblages and their significance for gas exploration in the Ordos Basin[J]. Natural gas industry, 2011, 31(12): 11-20.
- [5] 时保宏,刘亚楠,武春英,等.鄂尔多斯盆地古隆起东侧奥陶系马家沟组中组合成藏地质条件[J].石油与天然气地质,2013,34(5):610-618.
- SHI Baohong, LIU Yanan, WU Chunying, et al. Geological conditions for hydrocarbon accumulation in middle reservoir-source rock combination of the Ordovician Majiagou Formation on the east side of the paleo-uplift in Ordos Basin[J]. Oil & gas geology, 2013, 34(5): 610-618.
- [6] 于洲,丁振纯,王利花,等.鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段膏盐下白云岩储层形成的主控因素[J].石油与天然气地质,2018,39(6):1213-1224.
- YU Zhou, DING Zhenchun, WANG Lihua, et al. Main factors controlling formation of dolomite reservoir underlying gypsum-salt layer in the 5th member of Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin[J]. Oil & gas geology, 2018, 39(6): 1213-1224.
- [7] 张才利,刘新社,杨亚娟,等.鄂尔多斯盆地长庆油田油气勘探历程与启示[J].新疆石油地质,2021,42(3):253-263.
- ZHANG Caili, LIU Xinshe, YANG Yajuan, et al. Petroleum exploration history and enlightenment of Changqing Oilfield in Ordos Basin [J]. Xinjiang petroleum geology, 2021, 42(3): 253-263.
- [8] 付金华,于洲,李程善,等.鄂尔多斯盆地东部米探1井奥陶系马四段天然气勘探新发现及勘探方向[J].天然气工业,2021,41(12):17-27.
- FU Jinhua, YU Zhou, LI Chengshan, et al. New discovery and favorable areas of natural gas exploration in the 4th member of Ordovician Majiagou Formation by Well Mitan 1 in the eastern Ordos Basin[J]. Natural gas industry, 2021, 41(12): 17-27.
- [9] 张永生.鄂尔多斯盆地中南部奥陶系马四组白云岩成因及储集性研究[D].北京:中国地质科学院,1995.
- ZHANG Yongsheng. Study on the origin and reservoir characteristics of dolostones of Majiagou Formation 4 of the Ordovician in Ordos Basin[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1995.

- [10] 黄擎宇, 张峭楠, 丁晓琪, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系马家沟组白云岩成因研究[J]. 石油实验地质, 2010, 32(2): 147-153, 158.
- HUANG Qingyu, ZHANG Shaonan, DING Xiaoqi, et al. Origin of dolomite of Ordovician Majiagou Formation, western and southern margin of the Ordos Basin[J]. Petroleum geology and experiment, 2010, 32(2): 147-153, 158.
- [11] 付金华, 白海峰, 孙六一, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩储集体类型及特征[J]. 石油学报, 2012, 33(增刊2): 110-117.
- FU Jinhua, BAI Haifeng, SUN Liuyi, et al. Types and characteristics of the Ordovician carbonate reservoirs in Ordos Basin, China[J]. Acta petrolei sinica, 2012, 33(S2): 110-117.
- [12] 包洪平, 杨帆, 蔡郑红, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系白云岩成因及白云岩储层发育特征[J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 32-45.
- BAO Hongping, YANG Fan, CAI Zhenghong, et al. Origin and reservoir characteristics of Ordovician dolostones in the Ordos Basin[J]. Natural gas industry, 2017, 37(1): 32-45.
- [13] SU Zhongtang, MA Hui, HU Sunlong, et al. Early dolomitization and subsequent recrystallization of Middle Ordovician carbonates in the western flank of the Ordos Basin, Northern China: implications for hydrocarbon exploration[J]. Journal of Asian earth sciences, 2022, 233: 105241.
- [14] 于洲, 牛小兵, 张才利, 等. 鄂尔多斯盆地米脂地区奥陶系马四段储层成因与分布[J]. 天然气工业, 2021, 41(12): 38-48.
- YU Zhou, NIU Xiaobing, ZHANG Caili, et al. Genesis and distribution of reservoirs of the 4th member of Ordovician Majiagou Formation in the Mizhi area of the Ordos Basin[J]. Natural gas industry, 2021, 41(12): 38-48.
- [15] 于洲, 胡子见, 王前平, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系深层白云岩储集层特征及主控因素[J]. 古地理学报, 2023, 25(4): 931-944.
- YU Zhou, HU Zijian, WANG Qianping, et al. Characteristics and main controlling factors of the Ordovician deep dolomite reservoirs in mid-eastern Ordos Basin[J]. Journal of palaeogeography, 2023, 25(4): 931-944.
- [16] 牟春国, 许杰, 古永红, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组四段储层特征及主控因素[J]. 石油实验地质, 2023, 45(4): 780-790.
- MU Chunguo, XU Jie, GU Yonghong, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of the fourth member of Ordovician Majiagou Formation in the central and eastern Ordos Basin[J]. Petroleum geology and experiment, 2023, 45(4): 780-790.
- [17] 于洲, 罗晓容, 周进高, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组四段优质白云岩储层发育特征及成因机制[J]. 天然气工业, 2024, 44(2): 30-39.
- YU Zhou, LUO Xiaorong, ZHOU Jingao, et al. Development characteristics and genetic mechanisms of high-quality dolomite reservoirs in the 4th member of Ordovician Majiagou Formation in the Ordos Basin[J]. Natural gas industry, 2024, 44(2): 30-39.
- [18] 冯增昭, 鲍志东. 鄂尔多斯盆地奥陶纪马家沟组岩相古地理[J]. 沉积学报, 1999, 17(1): 1-8.
- FENG Zengzhao, BAO Zhidong. Lithofacies paleogeography of Majiagou Age of Ordovician in Ordos Basin[J]. Acta sedimentologica sinica, 1999, 17(1): 1-8.
- [19] 郭彦如, 赵振宇, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶纪层序岩相古地理[J]. 石油学报, 2012, 33(增刊2): 95-109.
- GUO Yanru, ZHAO Zhenyu, FU Jinhua, et al. Sequence lithofacies paleogeography of the Ordovician in Ordos Basin, China[J]. Acta petrolei sinica, 2012, 33(S2): 95-109.
- [20] 于洲, 丁振纯, 吴东旭, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组沉积相演化模式研究[J]. 海相油气地质, 2017, 22(3): 12-22.
- YU Zhou, DING Zhenchun, WU Dongxu, et al. Sedimentary facies evolution model of Ordovician Majiagou Formation, central-eastern Ordos Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2017, 22(3): 12-22.
- [21] 周进高, 席胜利, 邓红婴, 等. 鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系深层海相碳酸盐岩构造—岩相古地理特征[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 41-53.
- ZHOU Jingao, XI Shengli, DENG Hongying, et al. Tectonic-lithofacies paleogeographic characteristics of Cambrian-Ordovician deep marine carbonate rocks in the Ordos Basin[J]. Natural gas industry, 2020, 40(2): 41-53.
- [22] 于洲, 张道锋, 王维斌, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下沉积特征与有利储集相带[J]. 海相油气地质, 2022, 27(4): 371-382.
- YU Zhou, ZHANG Daofeng, WANG Weibin, et al. Sedimentary characteristics and favorable facies of Ordovician pre-salt strata in central-eastern Ordos Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2022, 27(4): 371-382.
- [23] 于洲, 王维斌, 魏柳斌, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组四段构造—岩相古地理新认识及勘探意义[J]. 地质学报, 2023, 97(8): 2645-2658.
- YU Zhou, WANG Weibin, WEI Liubin, et al. Tectonic paleogeographic framework of the fourth member of Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin and its significance for oil and gas exploration[J]. Acta geologica sinica, 2023, 97(8): 2645-2658.
- [24] LOHMANN K C, WALKER J C G. The $\delta^{18}\text{O}$ record of Phanerozoic abiotic marine calcite cements[J]. Geophysical research letters, 1989, 16(4): 319-322.
- [25] VEIZER J, ALA D, AZMY K, et al. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater[J]. Chemical geology, 1999, 161(1/3): 59-88.
- [26] 周进高, 付金华, 于洲, 等. 鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩主要储层类型及其形成机制[J]. 天然气工业, 2020, 40(11): 20-30.
- ZHOU Jingao, FU Jinhua, YU Zhou, et al. Main types and formation mechanisms of marine carbonate reservoirs in the Ordos Basin[J]. Natural gas industry, 2020, 40(11): 20-30.
- [27] 乔占峰, 于洲, 余敏, 等. 中国古老超深层海相碳酸盐岩储集层成因研究新进展[J]. 古地理学报, 2023, 25(6): 1257-1276.

- QIAO Zhanfeng, YU Zhou, SHE Min, et al. Progresses on ancient ultra-deeply buried marine carbonate reservoir in China [J]. *Journal of palaeogeography*, 2023, 25(6): 1257–1276.
- [28] 牛永斌, 单婷婷, 董小波, 等. 豫西北奥陶系马家沟组遗迹化石及其沉积环境[J]. *沉积学报*, 2015, 33(2): 211–225.

NIU Yongbin, SHAN Tingting, DONG Xiaobo, et al. Trace fossils and their sedimentary environment of Ordovician Majiagou Formation in the north-west of Henan Province [J]. *Acta sedimentologica sinica*, 2015, 33(2): 211–225.

编辑:刘江丽 张润合

Characteristics and main controlling factors of dolomite reservoir in the fourth member of the Ordovician Majiagou Formation in the northeast of Ordos Basin

SU Wenjie^{1,2,3}, LU Huili⁴, QIAO Demin⁵, LI Hui³, SHI Lei³, LUO Kaitong⁶

1. Xi'an Shiyou University; 2. Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology in Shaanxi Province; 3. Exploration Division of Changqing Oilfield Company of China National Petroleum Corporation; 4. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology; 5. Second Logging Branch of Bohai Drilling Engineering Co., Ltd, CNPC; 6. Chongqing University of Science and Technology

Abstract: Multiple exploration wells including well Mitán 1 have obtained high production natural gas flow in the dolomite of the fourth member of the Ordovician Majiagou Formation (O_1m_4) in the northeast of Ordos Basin, demonstrating that the O_1m_4 of the region has good exploration prospects. However, there is still controversy over whether large-scale dolomite reservoirs are developed in the O_1m_4 in the northeastern basin, and the unclear distribution of dolomite reservoirs restricts the next exploration deployment. Based on comprehensive data such as core, thin sections, field emission scanning electron microscopy and geochemical characteristics, a systematic study is conducted on the characteristics and development controlling factors of the O_1m_4 dolomite reservoir in the northeast of Ordos Basin. On this basis, the distribution of the O_1m_4 dolomite reservoir in the northeast of the basin is predicted. The research results indicate that: (1) Tidal flat type dolomite reservoir, mound-shoal type dolomite reservoir and bioturbation type dolomite reservoir are developed in the O_1m_4 in the northeast of Ordos Basin. The storage space of the three types of dolomite reservoir is mainly intergranular pores with a small number of micro cracks, and the average porosity is 4.77%, 5.12% and 2.52% respectively. (2) The formation of dolomite reservoirs is related to mound-shoal complex, bioturbation and dolomitization. The development of tidal flat type dolomite reservoir is related to dolomitization, which is the key to the formation of intergranular pores in such reservoirs. The development of the mound-shoal type dolomite reservoir is controlled by the mound-shoal complex and dolomitization. The mound-shoal complex is the material basis for reservoir development, and the dolomitization further enhances the compressive capacity of the reservoir, which is conducive to the preservation of intergranular pores. Bioturbation and dolomitization control the development of bioturbation type dolomite reservoir. The burrows formed by bioturbation lay the foundation for reservoir development. Dolomitization forms intergranular pores and is beneficial for pore preservation. (3) The Shenmu-Jingbian area in the northeast of the basin is located on a low uplift belt during the O_1m_4 period, which is conducive to the development of shoal-mound bodies, biological disturbance and dolomitization. The developed dolomite reservoirs can provide a large-scale storage space for natural gas enrichment.

Key words: dolomitization; bioturbation; mound-shoal complex; dolomite reservoir; the fourth member of Majiagou Formation; northeast of Ordos Basin

SU Wenjie, First author: Master Candidate, mainly engaged in research on natural gas exploration. Add: Changqing Technology, Fengcheng Fourth Rd., Weiyang District, Xi'an, Shaanxi 710018, China. E-mail: suwj_cq@petrochina.com.cn

LU Huili, Corresponding author: MSc, Senior Engineer, mainly engaged in carbonate reservoir prediction. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China. E-mail: luhl_hz@petrochina.com.cn